

## ΑΣΚΗΣΗ 3

### ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ KERR

#### 3.1. Σκοπός

Στην άσκηση που ακολουθεί θα μελετηθεί το φαινόμενο της τεχνητής διπλοθλαστικότητας που εμφανίζεται σε ένα υλικό, όταν εφαρμοσθεί σε αυτό ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο. Στα πλαίσια της άσκησης αυτής θα υπολογισθεί επίσης και η σταθερά *Kerr* του συγκεκριμένου αυτού υλικού. Θα μελετηθεί επίσης η παραγωγή κυκλικά πολωμένου φωτός και θα επιδειχθεί η ηλεκτρο-οπτική διαμόρφωση ακουστικού σήματος.

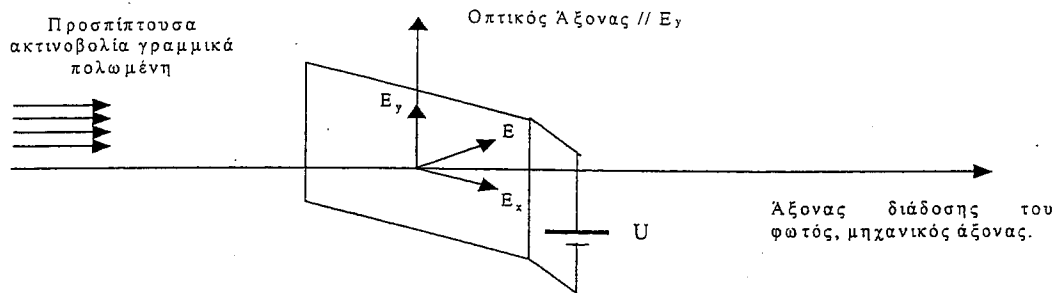
#### 3.2. Γενικά

##### Διπλοθλαστικότητα

Ονομάζεται το φαινόμενο εκείνο κατά το οποίο υλικό παρουσιάζει διαφορετικό δείκτη διάθλασης σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Τα υλικά της κατηγορίας αυτής ονομάζονται *ανισότροπα*. Η δομή τους είναι τέτοια ώστε το φως που ταξιδεύει σε τυχαία κατεύθυνση διάδοσης συναντά δυο διαφορετικούς δείκτες διάθλασης για ταλαντώσεις του ηλεκτρικού πεδίου, παράλληλα και κάθετα στον οπτικό άξονα (Ο.Α.) του υλικού.

Η διπλοθλαστικότητα μπορεί να είναι φυσική ιδιότητα ενός υλικού. Είναι όμως δυνατόν ένα μη διπλοθλαστικό (ισότροπο) υλικό να συμπεριφερθεί ως ανισότροπο με την επίδραση εξωτερικού παράγοντα π.χ. πίεσης, κάμψης, ηλεκτρικού πεδίου. Έτσι, όταν ορισμένα υγρά ή διηλεκτρικά υλικά βρεθούν σε ηλεκτρικό πεδίο, τα μόριά τους τείνουν να ευθυγραμμιστούν παράλληλα προς τη διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου. Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση του πεδίου, τόσο πιο πλήρης είναι η ευθυγράμμιση των μορίων. Επειδή τα μόρια του υλικού δεν είναι συμμετρικά η ευθυγράμμιση αυτή κάνει το υλικό ανισότροπο. Το φαινόμενο κατά το οποίο η παραπάνω ιδιότητα εμφανίζεται μέσω της εφαρμογής ενός ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου ονομάζεται *ηλεκτροοπτικό φαινόμενο Kerr* ή απλά *φαινόμενο Kerr*.

Στο πείραμα αυτό θα χρησιμοποιηθεί μονοχρωματική ακτινοβολία  $\lambda=632.8$  nm από πηγή laser He-Ne, που είναι γραμμικά και κάθετα πολωμένη. Η ακτινοβολία αυτή προσπίπτει σε υλικό PLZT (lead-lanthanum-zirconium-titanium) το οποίο είναι τοποθετημένο, έτσι ώστε ο οπτικός άξονας να σχηματίζει γωνία  $45^{\circ}$  με τον άξονα πόλωσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας laser, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Αρχή λειτουργίας του φαινομένου Kerr.

Το ηλεκτρικό πεδίο ( $E_{εξ}$ ) είναι κάθετο στον μηχανικό άξονα και εφαρμόζεται στο υλικό το οποίο γίνεται έτσι τεχνητά διπλοθλαστικό. Αν το πεδίο της προσπίπτουσας φωτεινής ( $E$ ) ακτινοβολίας αναλυθεί σε δυο συνιστώσες, παράλληλα και κάθετα στο εφαρμοζόμενο εξωτερικά ηλεκτρικό πεδίο, τότε: α) οι δύο αυτές συνιστώσες έχουν αρχικά (πριν εισέλθουν στο υλικό) την ίδια φάση, β) η μια από τις δύο συναντά δείκτη διάθλασης διαφορετικό ( $n_1$ ) από την άλλη ( $n_2$ ), στους δυο άξονες αντίστοιχα, και γ) εάν  $L$  είναι το πάχος του υλικού, δημιουργείται τότε μια διαφορά  $\Delta L$  ανάμεσα στους οπτικούς δρόμους των δυο ακτίνων, έτσι ώστε να ισχύει:

$$\Delta L = L(n_1 - n_2)$$

που αντιστοιχεί σε διαφορά φάσης  $\Delta$ :

$$\Delta = 2\pi \frac{L}{\lambda} (n_1 - n_2) \quad (1)$$

όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Μπορεί να αποδειχθεί ότι η διαφορά φάσης είναι ανάλογη του  $L$ , αλλά και του τετραγώνου της πόλωσης  $P$ . Γνωρίζουμε όμως ότι η πόλωση  $P$  συνδέεται γραμμικά με την ένταση του πεδίου  $E$ , οπότε εάν  $2\pi K$  είναι η σταθερά της αναλογίας αυτής, προκύπτει η εξίσωση:

$$\Delta = 2\pi K L E^2 \quad (2)$$

όπου,  $K$  είναι η σταθερά Kerr και:

$$E = \frac{U}{d} \quad (3)$$

όπου  $U$  είναι η εφαρμοζόμενη τάση και  $d$  η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων στα οποία εφαρμόζεται η τάση αυτή. Τυπικές τιμές της σταθεράς Kerr είναι  $2.4 \cdot 10^{-10} \text{ cmV}^{-2}$  για το νιτροβενζόλιο,  $4.4 \cdot 10^{-12} \text{ cmV}^{-2}$  για το νερό και  $3 \cdot 10^{-23} \text{ cmV}^{-2}$  για το γυαλί.

Η ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας πίσω από τον αναλύτη δίνεται με βάση τα παραπάνω (πολωτής και αναλύτης βρίσκονται σε γωνία  $45^\circ$  σε σχέση με το πεδίο στο PLZT) από την σχέση:

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\Delta}{2} \quad (4)$$

όπου,  $I_0$  είναι η ένταση πίσω από τον αναλυτή, όταν πολωτής και αναλυτής βρίσκονται ευθυγραμμισμένοι στην ίδια διεύθυνση και το πεδίο στο PLZT είναι μηδέν. Αντικαθιστώντας την εξίσωση (2) στην εξίσωση (4) και χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3) παίρνουμε:

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\pi KLU^2}{d^2} \quad (5)$$

οπότε επιλύοντας ως προς το  $U^2$  έχουμε:

$$U^2 = \frac{d^2}{\pi KL} \arcsin \sqrt{\frac{I}{I_0}} \quad (6)$$

Σχεδιάζοντας την γραφική παράσταση του  $U^2$  σε σχέση με το  $2 \arcsin \sqrt{\frac{I}{I_0}}$  λαμβάνουμε μια ευθεία γραμμή από την κλίση της οποίας υπολογίζεται η σταθερά  $K_{\text{eff}}$ , με την προϋπόθεση ότι είναι γνωστές οι διαστάσεις του κρυστάλλου PLZT.

### 3.3. Μέθοδος

#### Λειτουργία του PLZT σαν πλακίδιο $\lambda/4$ ή $\lambda/2$

Όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο η διαφορά φάσης που δημιουργείται ανάμεσα στις δυο συνιστώσες ( $E_x$  και  $E_y$ ) της προσπίπτουσας φωτεινής ακτινοβολίας ( $E$ ) εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση στον κρύσταλλο PLZT. Υπάρχει ηλεκτρική τάση  $V_{\lambda/4}$  για την οποία η προκύπτουσα διαφορά είναι φάσης  $\Delta = \frac{\pi}{2}$ , δηλαδή η καθυστέρηση της μιας συνιστώσας σε σχέση με την άλλη είναι  $\frac{\lambda}{4}$ , οπότε στην περίπτωση αυτή έχουμε μετατροπή του γραμμικά πολωμένου φωτός σε κυκλικά πολωμένο φως. Υπάρχει επίσης τάση  $V_{\lambda/2}$  για την οποία η προκύπτουσα διαφορά φάσης  $\Delta = \pi$  και επομένως θα έχουμε καθυστέρηση φάσης κατά  $\frac{\lambda}{2}$ . Στην περίπτωση αυτή το εξερχόμενο από το PLZT φως παραμένει γραμμικά πολωμένο με το επίπεδο ταλάντωσης του ηλεκτρικού πεδίου στραμμένο κατά  $90^\circ$  σε σχέση με το εισερχόμενο.

### 3.4. Πειραματική διάταξη – Εξαρτήματα

#### Πηγή LASER

Πρόκειται για μια πηγή laser He-Ne που εκπέμπει δέσμη μήκους κύματος 632.8nm με ισχύ εξόδου της τάξης των 2mW. Χρειάζεται προσοχή ώστε η δέσμη του laser να μην εισχωρήσει στο μάτι είτε κατευθείαν είτε από ανάκλαση. Αν και στο δέρμα δεν προκαλεί κάψιμο στο μάτι μπορεί να προκαλέσει βλάβη.

#### Στοιχείο PLZT

Το υλικό αυτό είναι ισότροπο, αλλά έχει την ιδιότητα κάτω από την επίδραση ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου να μετατρέπεται σε διπλοθλαστικό υλικό.

### Οπτικά εξαρτήματα

Δύο πολωτές από τους οποίους ο ένας πολώνει γραμμικά την εκπεμπόμενη ακτινοβολία laser, ενώ ο άλλος χρησιμοποιείται σαν αναλυτής για την ανίχνευση της πόλωσης του φωτός που παίρνουμε στην έξοδο του PLZT.

### Φωτοανιχνευτής

Εξάρτημα το οποίο ανιχνεύει την ένταση της προσπίπτουσας φωτεινής ακτινοβολίας και την μετατρέπει σε τάση ώστε να μπορεί να μετρηθεί από το βολτόμετρο.

### Άλλα εξαρτήματα

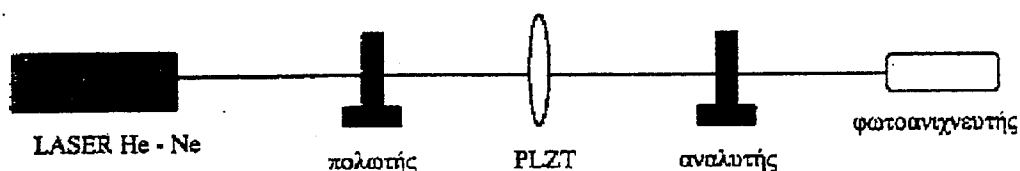
Ένα τροφοδοτικό συνεχούς υψηλής τάσης (0-10 kV) για την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου στον κρύσταλλο PLZT. Μια γεννήτρια παλμών που θα χρησιμοποιηθεί για την ηλεκτροοπτική διαμόρφωση ακουστικού σήματος. Ένας ενισχυτής για την ενίσχυση του σήματος που λαμβάνεται από τον φωτοανιχνευτή, αλλά και του διαμορφωμένου ακουστικού σήματος που ακούγεται από το μεγάφωνο. Ένα μεγάφωνο για την αναγνώριση του διαμορφωμένου ακουστικού σήματος, καθώς και ένα ψηφιακό βολτόμετρο για την ακριβή μέτρηση της τάσης του τροφοδοτικού του PLZT.

### Βιβλιογραφία

M. Young, "Οπτική και Lasers", ΟΕΔΒ 1998.  
PHYWE, Physics Experiments, Göttingen, 2003.

### 3.5. Εκτέλεση της άσκησης

1. Πραγματοποιήστε την πειραματική διάταξη για την επίδειξη του φαινομένου Kerr, όπως περιγράφεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Πειραματική διάταξη μελέτης φαινομένου Kerr.

2. Βάλτε το laser σε λειτουργία και ευθυγραμμίστε την διάταξη, έτσι ώστε όλες οι ενδεχόμενες ανακλάσεις της δέσμης laser πάνω στα οπτικά εξαρτήματα της διάταξης να βρίσκονται επάνω στον άξονα διάδοσης του φωτός. Η δέσμη του laser πρέπει να διέρχεται από το κέντρο τους. Ρυθμίστε τον πολωτή ώστε να λαμβάνουμε μέγιστη ένταση στο πλακίδιο PLZT και τοποθετήστε τον αναλυτή σε γωνία  $90^0$  ως προς τον πολωτή.

3. Βάλτε το βολτόμετρο σε λειτουργία. Το βολτόμετρο είναι συνδεδεμένο μέσω του ενισχυτή, με τον φωτοανιχνευτή. Ακολουθώντας, επιλέγοντας την κλίμακα της μέγιστης ευαισθησίας ρυθμίστε την ενίσχυση του σήματος, ώστε το βολτόμετρο να δείχνει

μηδέν, όταν η δέσμη laser δεν προσπίπτει στον ανιχνευτή. Καλό θα ήταν το πείραμα να εκτελείται με όσο το δυνατόν χαμηλότερο φωτισμό, ώστε να μην διεγείρεται ο φωτοανιχνευτής από την ακτινοβολία του περιβάλλοντος (ακτινοβολία υποβάθρου).

4. Αρχικά κρατήστε την τάση στο τροφοδοτικό του PLZT στ μηδέν και αφήστε να περάσει η δέσμη laser. Στρέψτε τον πολωτή και τον αναλυτή σε γωνία  $90^\circ$  και διαπιστώσετε ότι δεν φτάνει φως στον ανιχνευτή (εξηγήστε).

5. Μετρήστε τη σχετική ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας που πέφτει πάνω στον ανιχνευτή  $\frac{I}{I_0}$  σε σχέση με την εφαρμοζόμενη τάση στον κρύσταλλο PLZT.

Μεταβάλλετε την εφαρμοζόμενη υψηλή τάση από 0 – 1000 Volts με βήμα 25 Volts. **Προσοχή να μην ξεπεραστεί το όριο των 1000 Volts, διότι υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του κρυστάλλου PLZT.** Με τις μετρήσεις που λάβατε δημιουργείστε τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1

Εφαρμοζόμενη τάση U (Volts)	Ένταση ακτινοβολίας I (τυχαίες μονάδες μέτρησης)	$\frac{I}{I_0}$	$\frac{\Delta}{2} = \arcsin \sqrt{\frac{I}{I_0}}$
0			
100			
125			
150			
175			
200			
225			
.			
.			
.			
1000			

Σημείωση: να υποθέσετε ότι το  $I_0=1.265$  (σε τυχαίες μονάδες)

6. Συνδέστε σε σειρά την παλμογεννήτρια (η οποία πρέπει να έχει ρυθμιστεί ώστε να δίνει μια ακουστική συχνότητα) με το τροφοδοτικό υψηλής τάσης το οποίο ρυθμίζουμε να μας δίνει τάση 500 Volts. Το διαμορφωμένο σήμα εφαρμόζεται στο PLZT. Αντικαταστήσετε το βολτόμετρο στην έξοδο του ενισχυτή (προτεινόμενη ενίσχυση  $\approx 10$ ) με το μεγάφωνο, συνδέοντας το σήμα στην είσοδο των 5 k $\Omega$ . Το πλάτος του σήματος της παλμογεννήτριας πρέπει να ρυθμιστεί κατάλληλα ώστε να ακουσθεί η συχνότητα αυτή από το μεγάφωνο (προτεινόμενη συχνότητα  $\approx 1$ kHz). Εκτελέστε το πείραμα αυτό αφού ο επιβλέπων ελέγξει την συνδεσμολογία που πραγματοποιήσατε.

### 3.6. Επεξεργασία των μετρήσεων

1. Πραγματοποιήστε την γραφική παράσταση της σχετικής έντασης στον ανιχνευτή  $\frac{I}{I_0}$  σε σχέση με την εφαρμοζόμενη τάση στο PLZT. Εξηγήστε που οφείλονται τα παρατηρούμενα μέγιστα και ελάχιστα.

2. Πραγματοποιήστε την γραφική παράσταση της σχετικής έντασης στον ανιχνευτή  $\frac{I}{I_0}$  σε σχέση με τη διαφορά φάσης  $\Delta$ . Ποία είναι η τάση λειτουργίας του PLZT σαν πλακίδιο  $\frac{\lambda}{2}$  και σαν πλακίδιο  $\frac{\lambda}{4}$ ;

3. Πραγματοποιήστε την γραφική παράσταση του τετραγώνου της εφαρμοζόμενης τάσης στο PLZT ( $U^2$ ) σε σχέση με την διαφορά φάσης  $\Delta$ . Από την κλίση της ευθείας που προκύπτει και με βάση την εξίσωση (6) υπολογίστε την σταθερά  $K_{\text{eff}}$  του υλικού (θεωρήστε ότι  $L=1.5\text{mm}$  και  $d=1.4\text{mm}$ ). Οι θεωρητικά υπολογισμένες τιμές για την κλίση της ευθείας στην παραπάνω γραφική παράσταση είναι  $1.36 \cdot 10^3 \frac{\text{Volt}^2}{\text{deg}^2}$  και για τη

σταθερά  $K_{\text{eff}}$  είναι  $K = 2.7 \cdot 10^{-9} \left[ \frac{\text{m}}{\text{Volt}^2} \right]$  αντίστοιχα. Να δικαιολογήσετε τυχόν αποκλίσεις που παρουσιάζονται.